

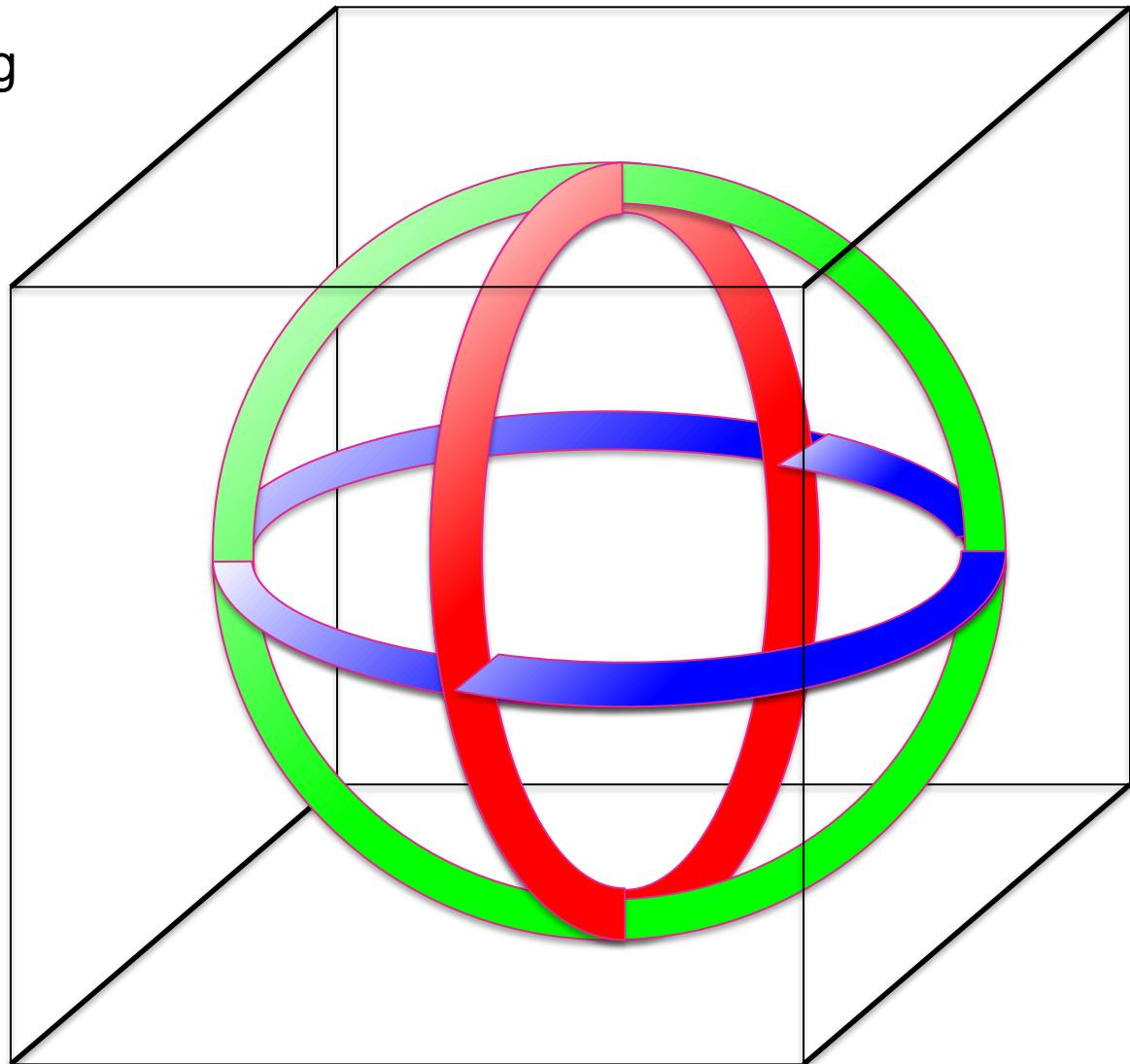
Sensordatenverarbeitung

# GYROMETER (5C)

(11.-15.11.24)

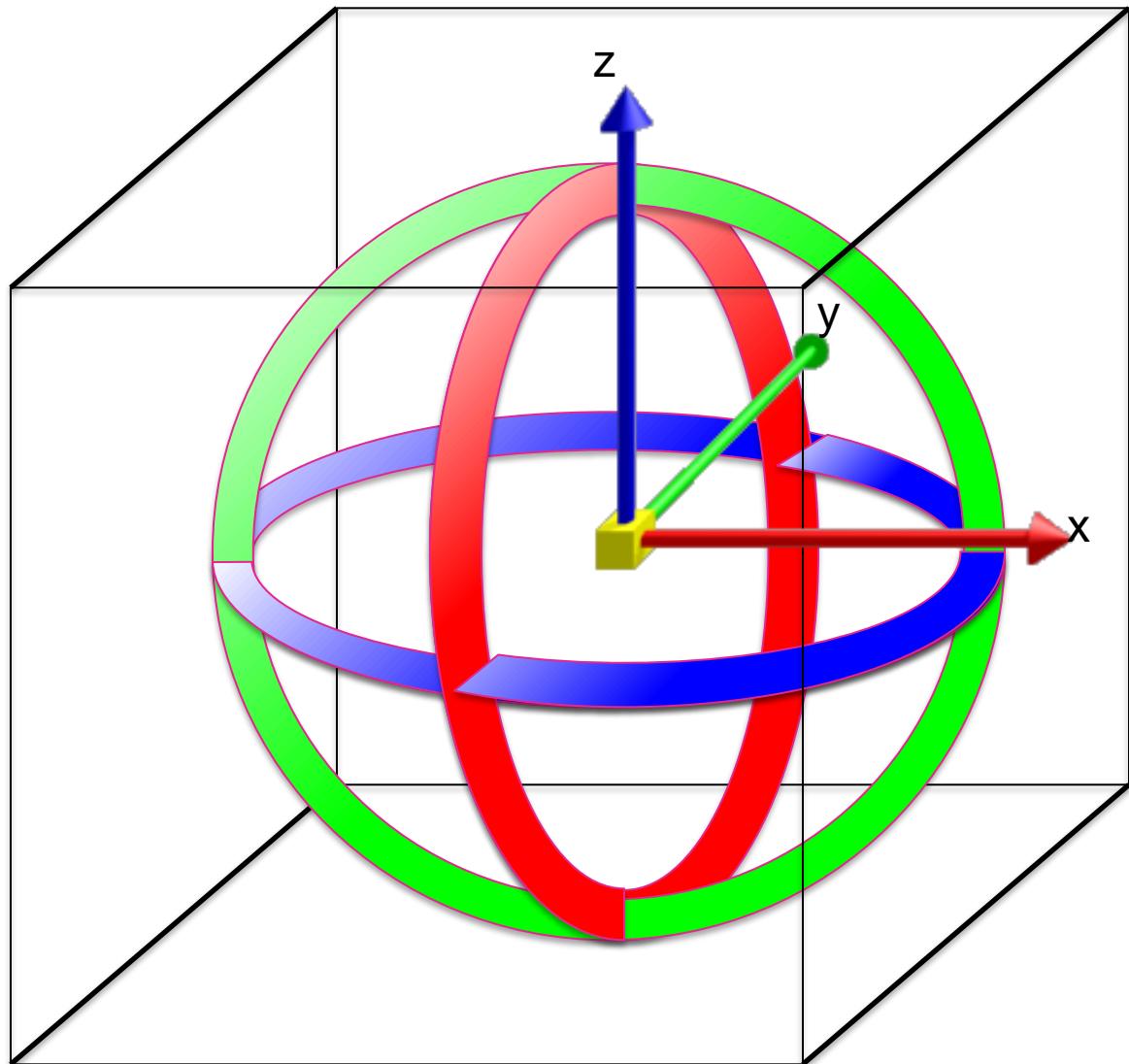
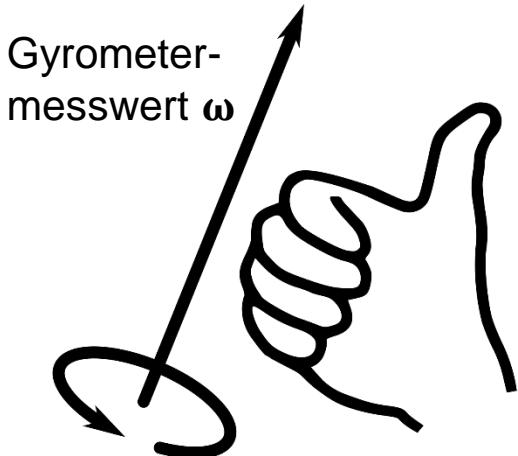
# Was misst ein Gyrometer?

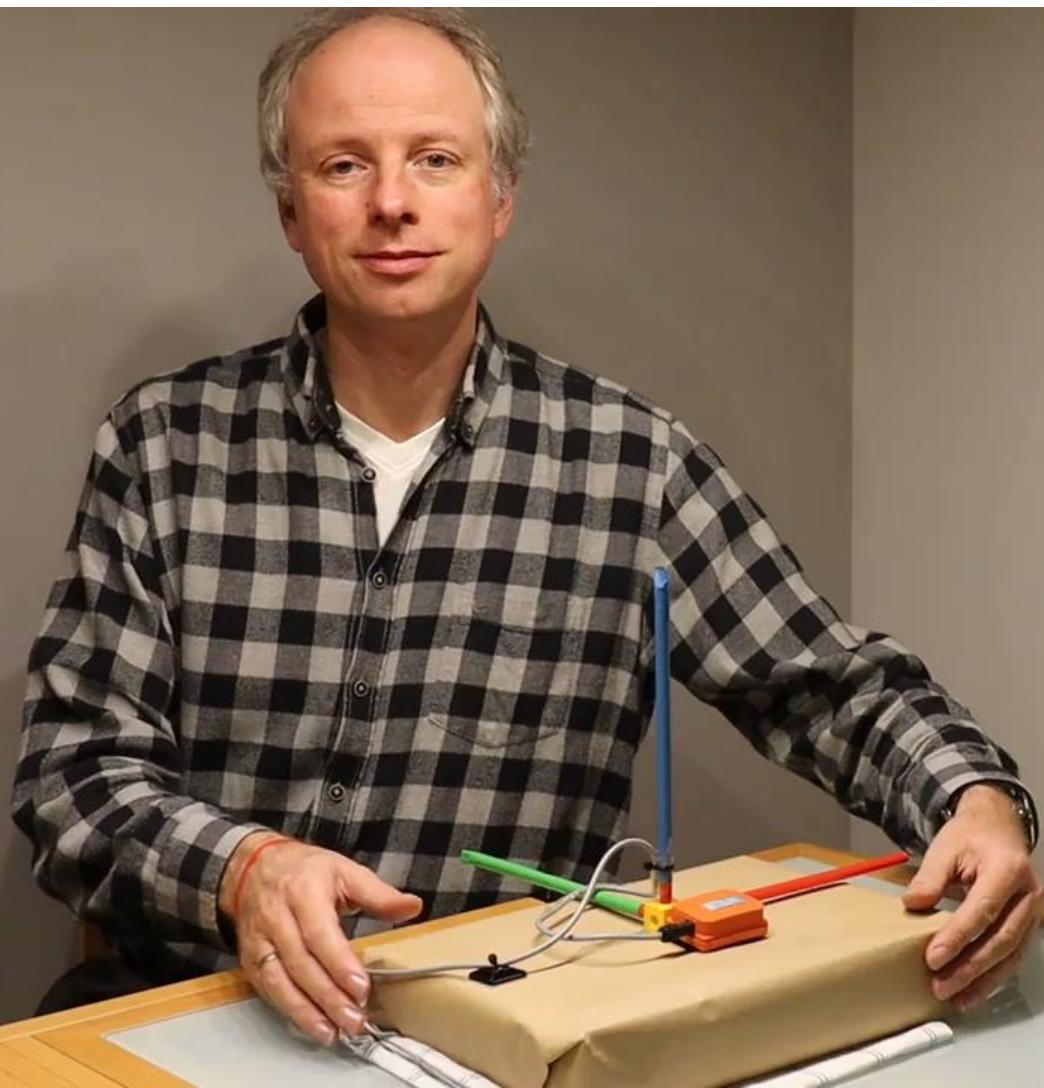
- Licht durchläuft einen Ring in zwei Richtungen und interferiert danach
- Licht fliegt im Raum mit fester Geschwindigkeit
- Dreht sich der Ring
  - ist der Weg in einer Richtung kürzer als in der anderen
  - Interferenz ändert sich
  - Änderung wird gemessen
- Aufbau der lowcost Chip-Gyrometer anders
  - geht hier ums Prinzip



# Bezeichnung von Drehungen

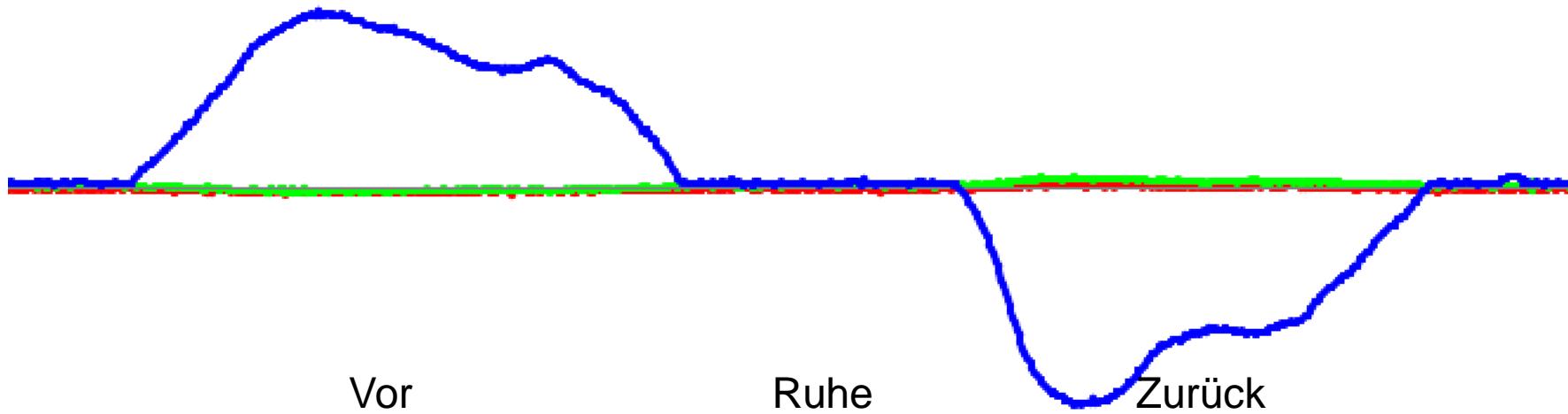
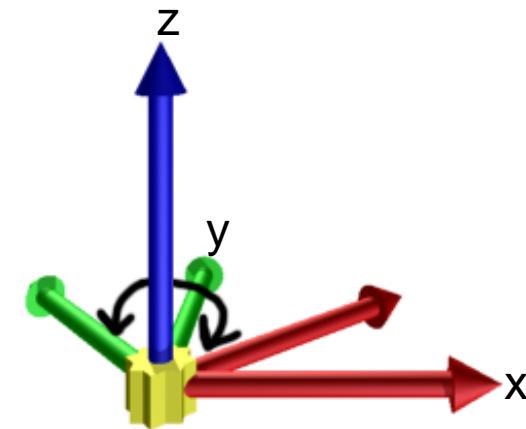
- "Um X"
  - X ist Drehachse
  - in Y/Z Ebene
- Rechte-Hand-Regel:
  - Daumen der rechten Hand zeigt Richtung Achse
  - gekrümmte Finger zeigen Drehung an





# Drehung um +/-Z

- Drehung um Z-Achse vor und zurück
  - Drehgeschwindigkeit um eine Achse
  - Nicht Drehbeschleunigung wie beim menschlichen Gleichgewichtsorgan

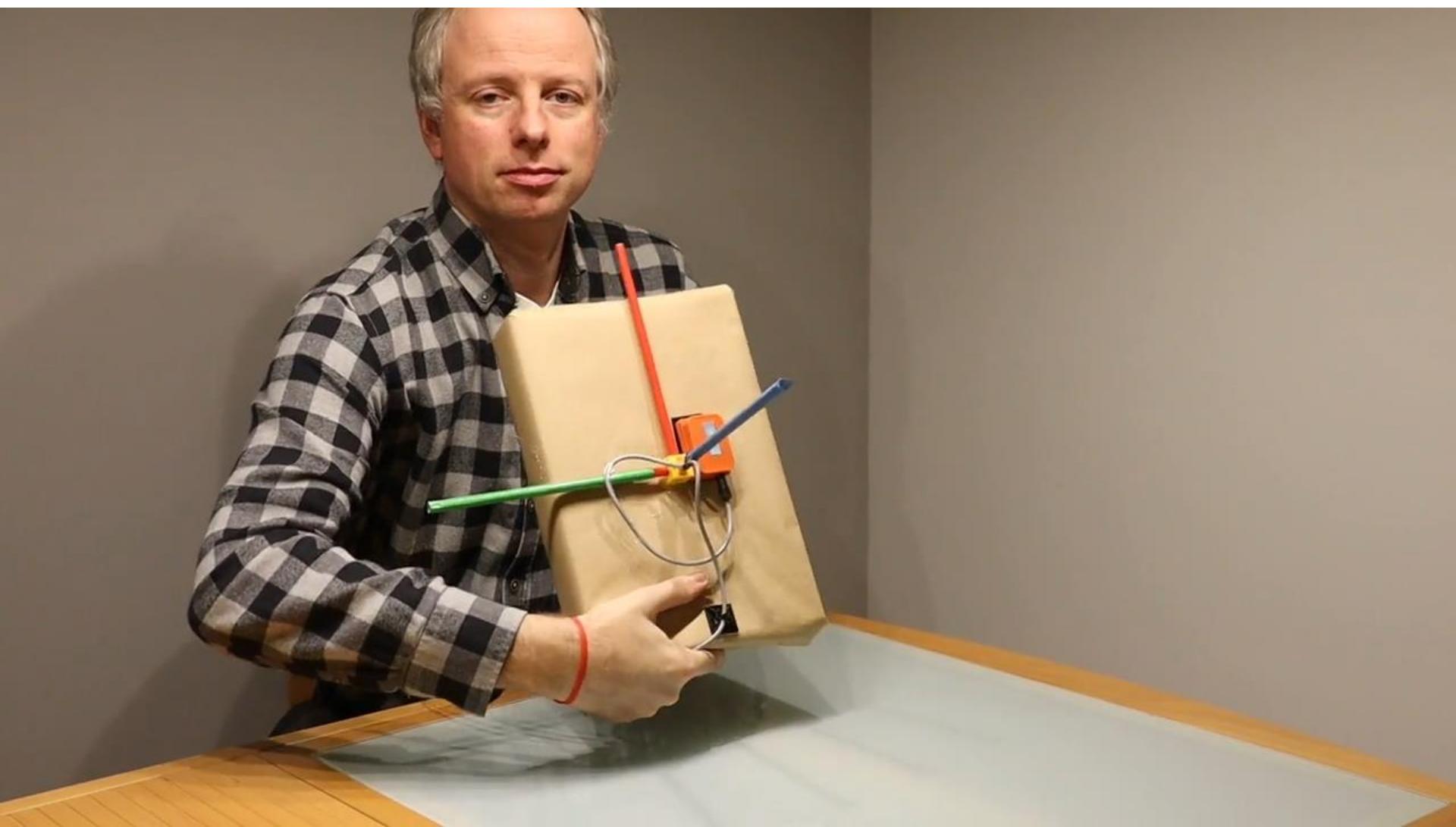


- Erste Idee für eine Formel Drehrate → Orientierung\*
- Aufsummieren der Drehung zu Winkeln, jeweils um X, Y, Z
- Fachwort: Aufintegrieren
- Winkel um X, Y, Z der die Orientierung beschreibt  $\theta_t$
- Orientierung als  $3 \times 3$ -Matrix  $R_t$
- Drehrate (Gyrometer-Messung)  $\omega_t$
- Zeitschritt  $\delta t$

$$\theta_{t+\delta t} = \theta_t + \delta t \omega_t$$

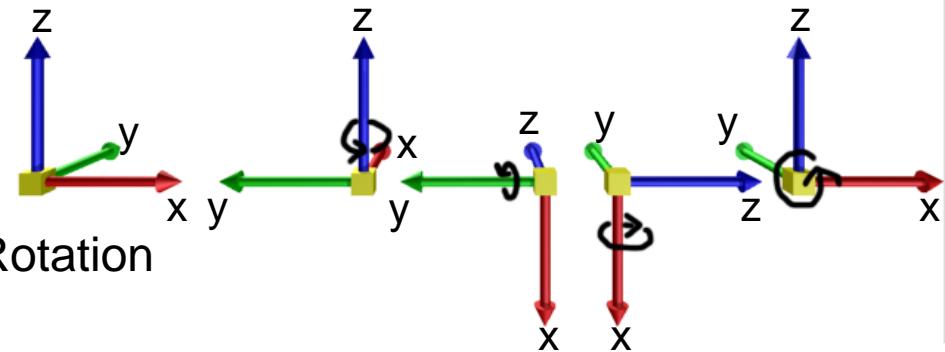
$$R_{W \leftarrow I_t} = \text{Rot}(\theta_t)$$

\*ACHTUNG: Vereinfacht und noch nicht richtig!



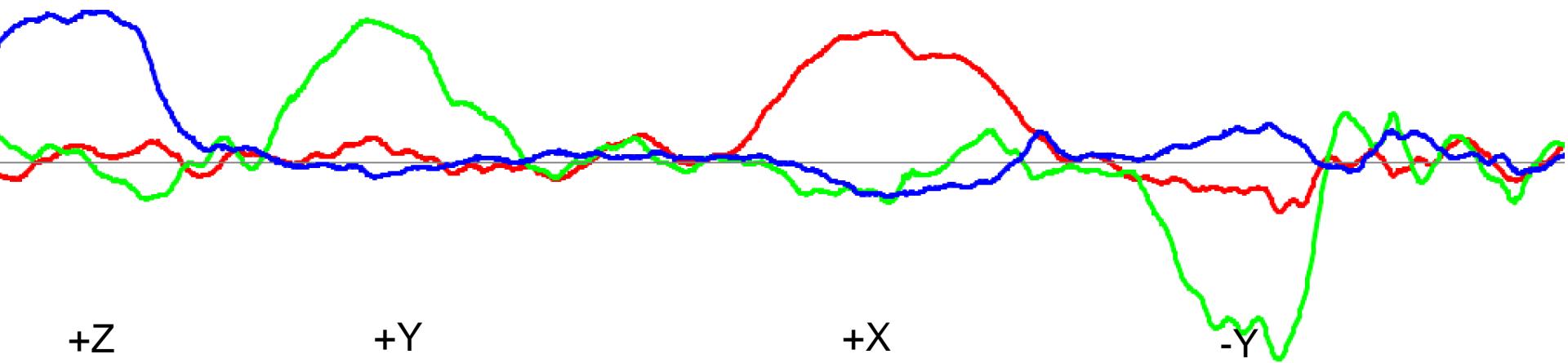
- Rotation um  $+Z+Y+X-Y$  jeweils  $90^\circ$

- Achtung: nebeneinander gezeichnet, aber selbe Position gemeint
  - Endet in der Anfangsorientierung
  - Laut Winkelsumme aber eine  $+X+Z$  Rotation



- Konsequenzen

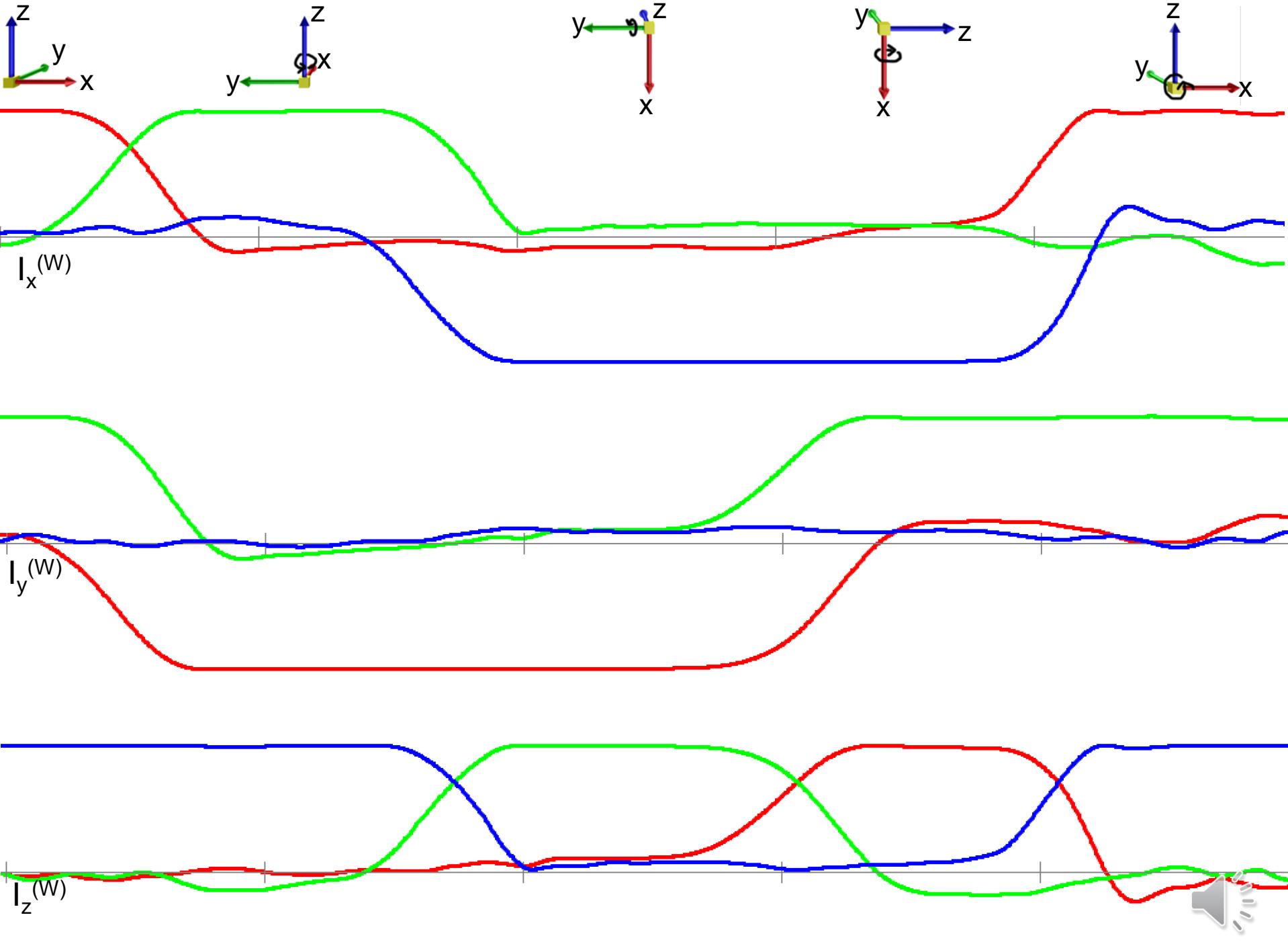
- Nicht im Sensorframe aufintegrieren!
  - Müssen im Weltframe aufintegrieren!
  - Sensordaten nach Weltframe umrechnen



- Richtige Idee für eine Formel Drehrate → Orientierung
- Jeder Zeitschritt ist eine kleine Rotation  $\text{Rot}(\delta t \omega_t)$
- Verkettung von Rotationen über die Zeit
- Aufmultiplizieren statt aufsummieren
- Orientierung als  $3 \times 3$ -Matrix  $R_t$
- Drehrate (Gyrometer-Messung)  $\omega_t^{(lt)}$
- Zeitschritt  $\delta t$

$$R_{W \leftarrow I_{t+\delta_t}} = R_{W \leftarrow I_t} \underbrace{\text{Rot}(\delta t \omega_t^{(I_t)})}_{R_{I_t \leftarrow I_{t+\delta_t}}}$$

- Nächste Folie: Die selbe Rotationssequenz mit obiger Formel



- Formel Beschleunigung, Drehrate → Pose\*
- Orientierung als  $3 \times 3$ -Matrix  $R_t$
- Drehrate (Gyrometer-Messung)  $\omega_t$
- Position  $p_t$
- Geschwindigkeit  $v_t$
- Beschleunigung (Accelerometer-Messung)  $a_t$
- Zeitschritt  $\delta t$
- Gravitationsvektor  $g^{(W)}$  (nach unten)

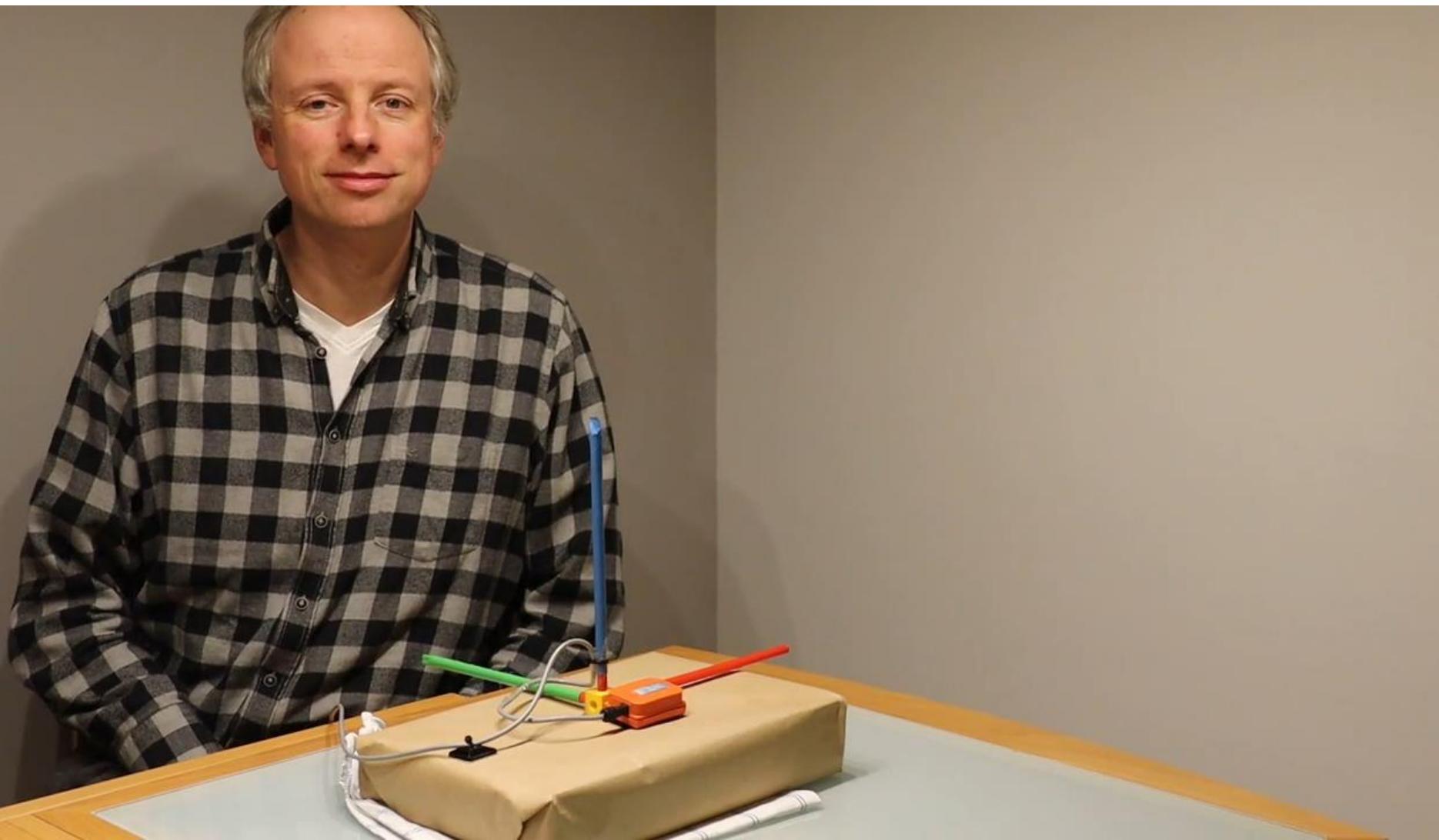
$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t(R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)} + g^{(W)})$$

$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

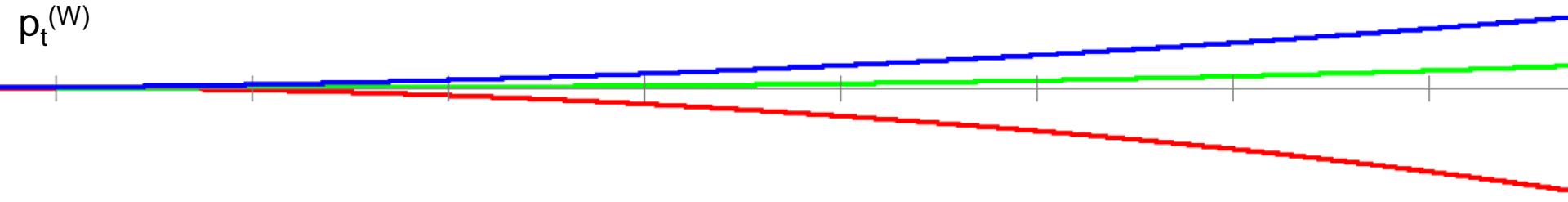
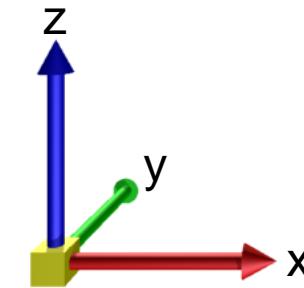
$$R_{W \leftarrow I_{t+\delta t}} = R_{W \leftarrow I_t} \text{Rot}(\delta t \omega_t^{(I_t)})$$

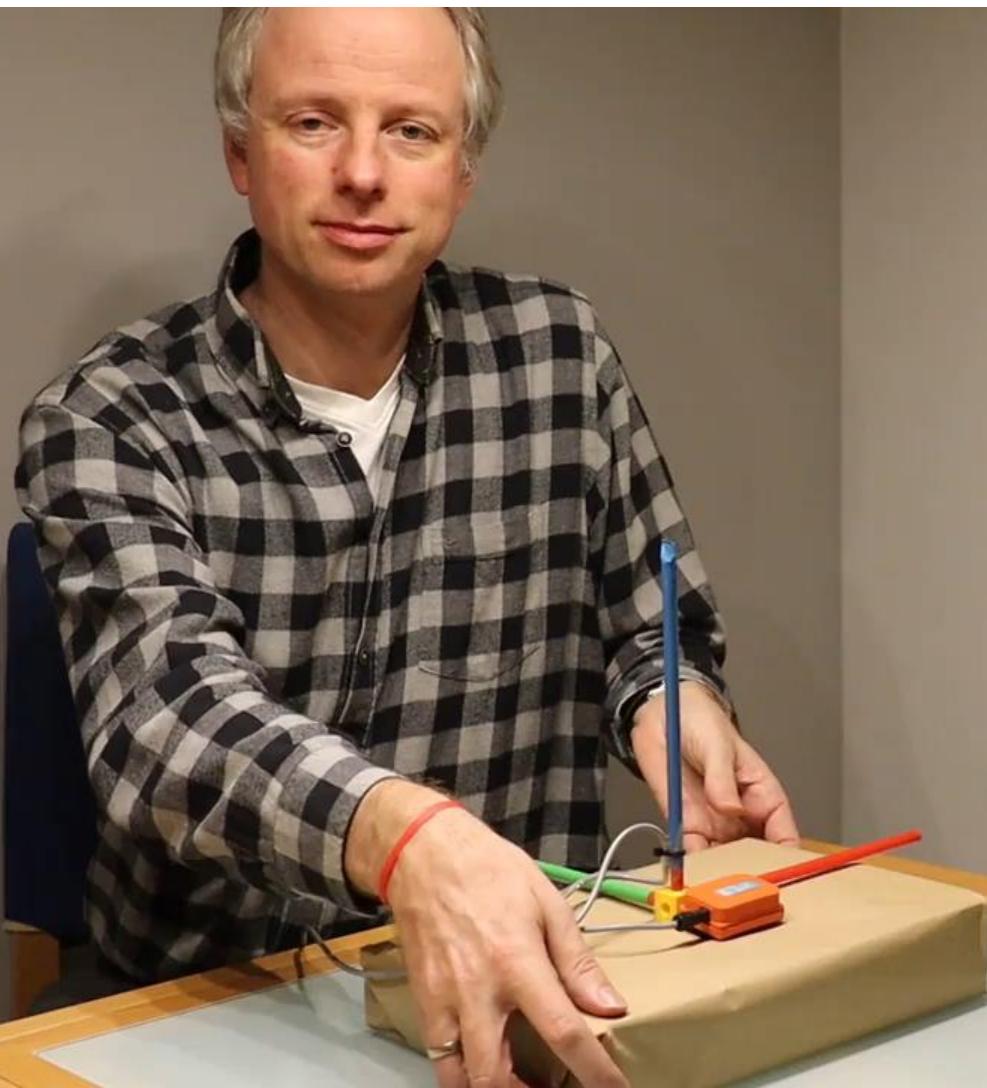
\*Immer noch vereinfacht

# Inertialsensor in Ruhe

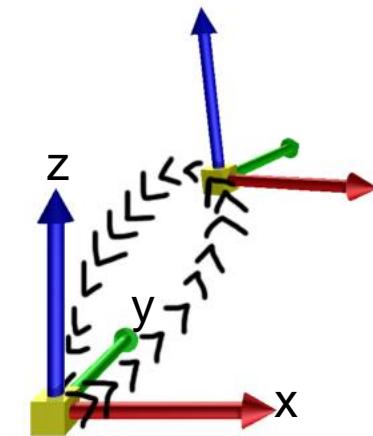


- Fehler akkumulieren sich
- Nach ein paar Sekunden driftet Position  $p_t$
- Aufakkumulierende Fehlerkette
  - Gyrofehler
  - Orientierungsfehler → Gravitationsfehler
  - Geschwindigkeitsfehler
  - Positionsfehler

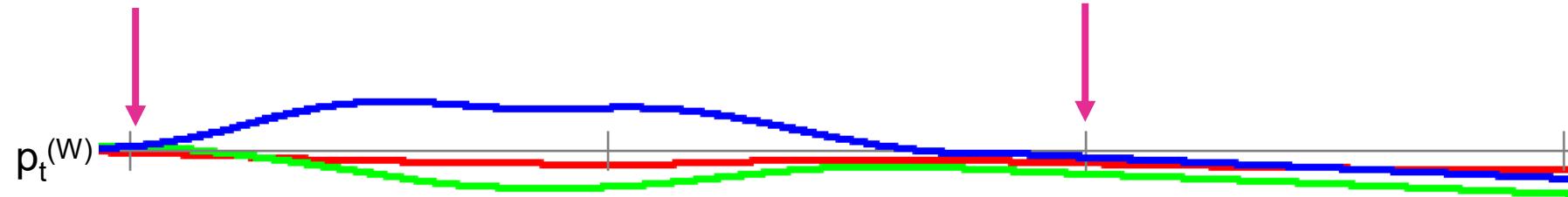




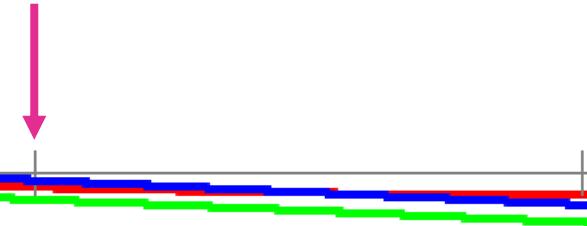
- Rotation und Translation gleichzeitig
- Funktioniert im Prinzip
- Driftet aber schnell davon.
  - Sensor recht alt
  - Neue Sensoren besser



Bewegung Start



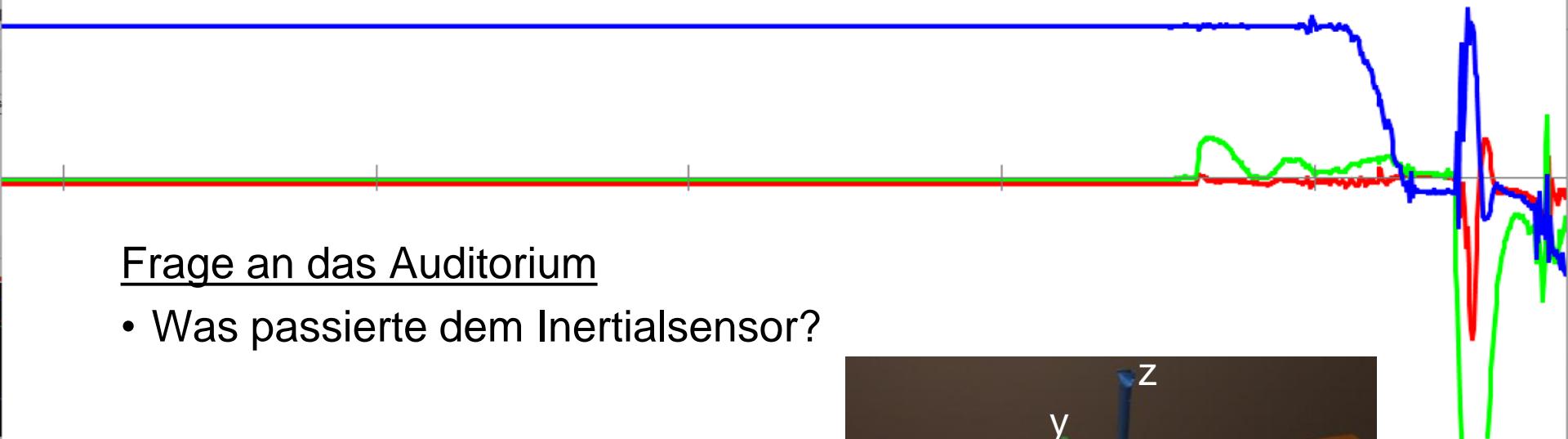
Bewegung Ende



ACHTUNG: Hier ist anscheinend noch ein Fehler, die Bewegung sollte nach +Y gehen.

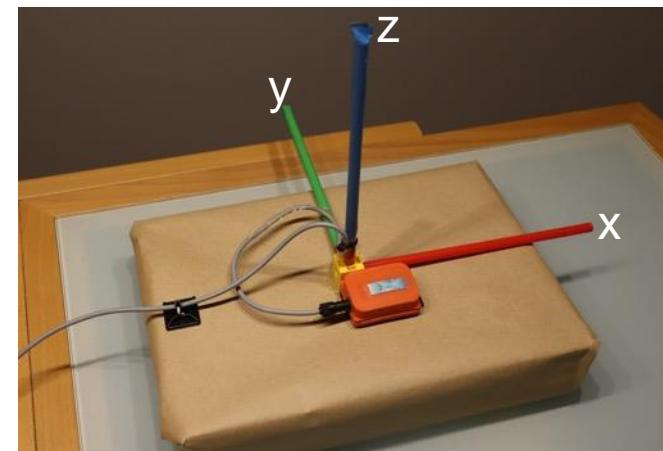
- Inertialsensor kein dauerhafter Posensensor
  - Wegen Drift
- Aber dauerhafter Neigungssensor
- Aber dauerhafter Orientierungssensor
  - Mit Magnetometer
- Kurze Bewegungen (Schritte, Sport, ...)
- Kombination (Fusion) mit Kamera, oder GPS, o.ä.
  - Theorie der Sensorfusion
- Kombination mit Zusatzannahmen
  - Schritte in der Ebene
  - Länge der Gliedmaßen am menschlichen Körper
- Qualitative Auswertung (Muster erkennen)

accelerometer

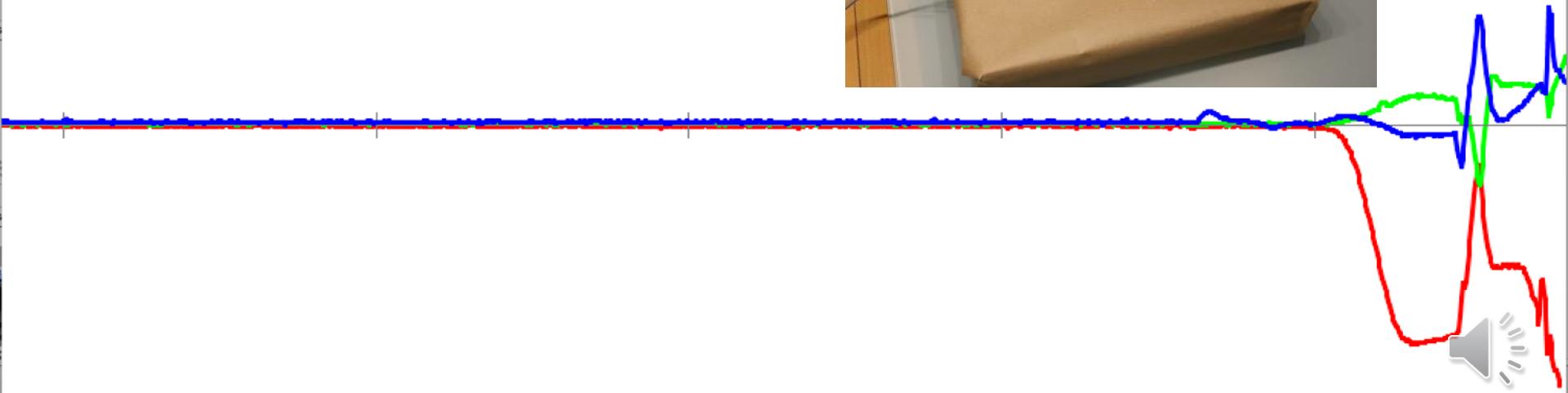


### Frage an das Auditorium

- Was passierte dem Inertialsensor?



gyrometer



accelerometer

1

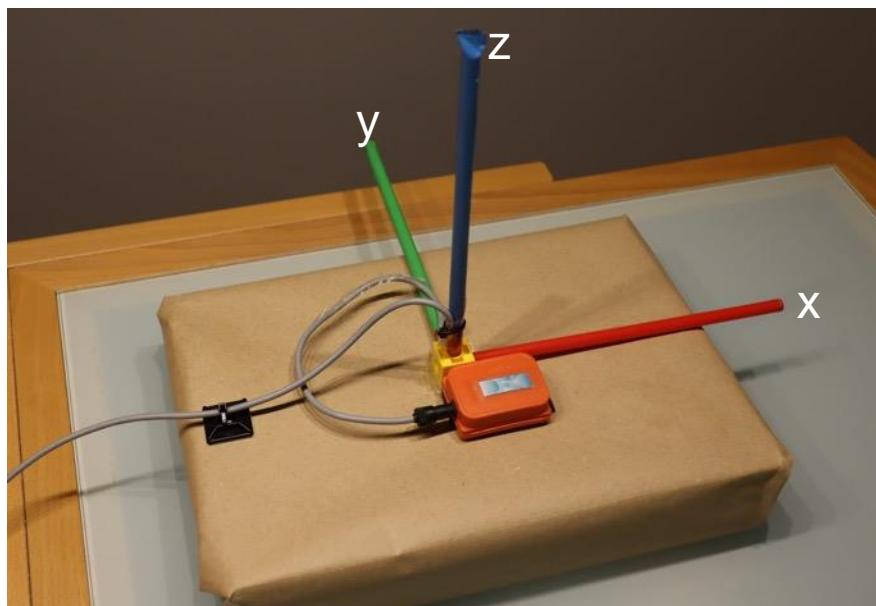
2

3

4

5

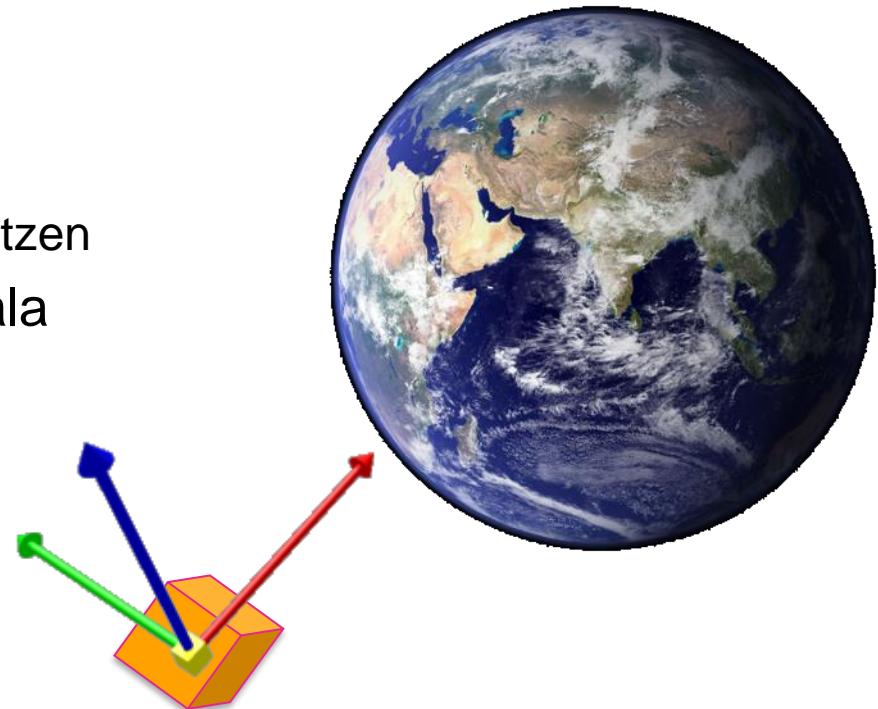
gyrometer



1. Lag auf dem Tisch
2. Bewegte sich Richtung Tischkante (+Y)
3. Kippte über die Kante
4. Fiel herunter
5. Schlug auf



- Erde dreht sich
  - Weltkoordinatensystem z.B. an Sternen fest machen
  - Erdkoordinatensystem bewegt sich relativ dazu
- Gravitation positionsabhängig
  - Zum Erdmittelpunkt
  - Stärke abhängig von Höhe
  - Stärke leicht abhängig vom Ort
  - Geologisches Gravitationsmodell nutzen
- Für Navigation auf geografischer Skala
  - Mit hochwertigen IMUs



- **Weiterführende Information zum technischen Aufbau**

- **Bosch Deutschland**

Video zum Funktionsprinzip eines MEMS Gyrometers (Drehratensensor)

[https://www.youtube.com/watch?v=6\\_yhOORMpc8](https://www.youtube.com/watch?v=6_yhOORMpc8), 2020

- **Bosch Deutschland**

Video zum Funktionsprinzip eines Accelerometers (Beschleunigungssensor)

<https://www.youtube.com/watch?v=swCTbz5sIQM>, 2020

# Zusammenfassung

- Inertialsensor besteht aus Accelerometer und Gyrometer
- Accelerometer
  - misst Beschleunigung MINUS Gravitation in Sensorkoordinaten
  - Integration zu Geschwindigkeit und Position in Weltkoordinaten
- Gyrometer
  - misst Drehrate in Sensorkoordinaten
  - Integration durch Aufmultiplizieren von Drehmatrizen

$$v_{t+\delta t}^{(W)} = v_t^{(W)} + \delta t(R_{W \leftarrow I_t} a_t^{(I_t)} + g^{(W)})$$

$$p_{t+\delta t}^{(W)} = p_t^{(W)} + \delta t v_t^{(W)}$$

$$R_{W \leftarrow I_{t+\delta t}} = R_{W \leftarrow I_t} \text{Rot}(\delta t \omega_t^{(I_t)})$$

**ACHTUNG**  
Schwieriger Stoff!  
Zügig nacharbeiten!



- Accelerometer X/Y
  - Schritt +X
  - Schritt –X
  - Schritt +Y
  - Schritt +X mit Rotation 180° Z
- Accelerometer X/Y/Z
  - Ruhe, Schritt nach +Z
  - Ruhige Drehung am Ort
  - Ruckelige Drehung am Ort
- Gyrometer
  - Rotation um Z vor und zurück
  - Rotation um +Z+Y+X-Y jeweils 90°
- Orientierung (aus Gyrometer integriert)
  - Rotation um +Z+Y+X-Y jeweils 90°
- Pose (aus Gyrometer und Accelerometer integriert)
  - Sensor in Ruhe
  - Sensor hochgehoben und genau wieder zurückgesetzt

- Schorschi2, Die Rechte-Faust-Regel,  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Korkenzieherregel#/media/Datei:Right-hand\\_grip\\_rule.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Korkenzieherregel#/media/Datei:Right-hand_grip_rule.svg),  
2009, CC-0